

Füüsika bioloogias: II Bioloogiline füüsika

Arvi Freiberg

Füüsika Instituut

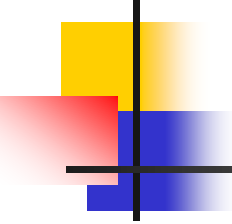
Molekulaar- ja Rakubioloogia Instituut





- Bioloogiline füüsika
LOMR.07.011
- 3 EAP, II k kevad

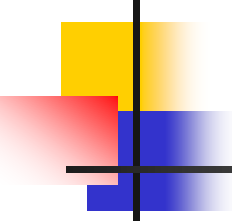
- Füüsika alused
LOMR.07.012
- 3EAP, I k kevad



Kursus koosneb

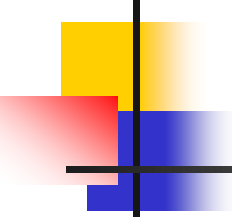


- Loengutest
11 kahetunnilist loengut
vahemikus 10. aprill – 4. mai 2015
 - E/T/N 14.15-15.45
- Praktikumidest (3+1)
- Seminarist/harjutustunnist (3):
8., 9., 11. mai



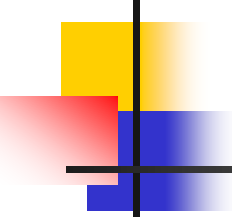
Kursuse eesmärk

- Kursuse põhieesmärgiks on anda ettekujutus molekulaarse (sh bioloogilise) aine ehitusest ja funktsioneerimise üldistest seaduspärasustest
- Bioloogilise füüsika kaugem eesmärk on uurida füüsika põhipostulaatide kehtivust ja asjakohasust bioloogiliste küsimuste lahendamisel



Loengud

- Ettekujutus füüsikalisest maailmapildist kui maailma mudelist kujundatakse erinevaid füüsikalisi nähtusi uurides.
- Selleks kasutatakse füüsika mudeleid ja seadusi.
- Antud kursus püüab anda ettekujutust molekulaarse (sh bioloogilise) aine ehitusest ja funktsioneerimise üldistest seaduspärasustest toetudes kvantfüüsikale ja termodünaamikale.
- Õpitavat illustreeritakse rohkete asjakohaste näidete ja ülesannetega.

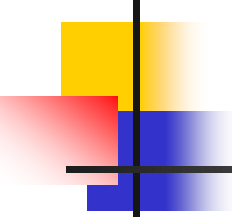


Praktikumid

- **Praktikumid** (Riia 23, ruum 209) on seatud loengutes saadud teoreetiliste teadmiste näitlikustamiseks ja tegelikkusega seostamiseks, reaalse, “käed sees” laboritöö tunnetamiseks, aga ka täiendava teabe saamiseks

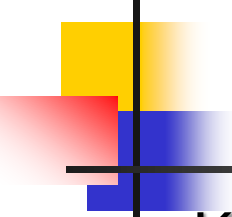
Praktikunitööd (täpsustuvad töö käigus):

1. Valguse polarisatsioon. Lahustunud ainete eripöörangu ja kontsentratsiooni määramine polarimeetriga
2. Vedeliku pindpinevus ja kapillaartõus
3. Valguskiirguse parameetrite mõõtmine
4. FI biofüüsika labori külastamine (aeg täpsustub töö käigus)



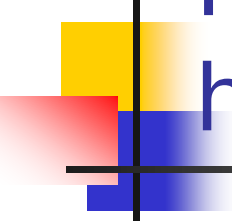
Seminarid/konsultatsioonid

- **On seatud kirjalikuks eksamiks ettevalmistamiseks**
- **Seminarides** (Vanemuise 46, ruum 225)
 - selgitatakse raskemini mõistetavaid teoreetilisi konstruktsioone (Teie tagasiside väga vajalik!)
 - korratakse tuletatakse meelde varemõpitud hädavajalikke matemaatilisi ja füüsikalisi teadmisi
 - õpitakse/süvendatakse kursusega seotud ülesannete lahendamise võtteid
 - saavutatakse vilumus ülesannete lahendamisel
 - jne



Teadmiste kontroll ja hindamine

- Kirjalik eksam (eristuv)
 - Kuni 15 küsimust + 4 ülesannet.
 - Aega vastamiseks 2h
 - Positiivse soorituse tase („E“)
 - 1 kordusvõimalus (ilma erandita, palvekirju palun mitte kirjutada!)
- Praktikumid peavad kursuse arvestamiseks olema samuti positiivselt arvestatud
- Positiivsele hindele läbitud praktikumid jm nõutu kehtivad 3 aastat
 - st, kui arvestus sooritatakse nt 4. a, peab praktikumid/kontrolltööd uuesti tegema



Kursus lõpeb kirjaliku eksamiga, mida hinnatakse eristuvalt (A, B jne)

- 18. mai 10-12 (Vanemuise ring)
- 19. mai 10-12 (Vanemuise ring)
- Järeleksam 2. juuni 10-12 (Vanemuise ring)

Mida eksamil küsitakse?

Õpiväljundid: Kursuse läbinud üliõpilane

- Mõistab mateeria kvantolemust ning orienteerub vastavates mõistetes ja terminoloogias;
- Teab, mis on aatomid, molekulid ja lausaine ning oskab kirjeldada nende objektide põhilisi struktuurseid erisusi;
- Tunneb ainete uurimise põhilisi spektroskoopilisi meetodeid;
- Suudab kirjeldada lausaine erinevate faaside omadusi ja üleminekuid faaside vahel;
- Teab termodünaamika seaduseid ja oskab neid lahti seletada;
- Tunneb ja oskab lahti mõtestada selliseid termodünaamika mõisteid nagu energia, töö, soojus, temperatuur, entroopia jne;
- Teab, mis on raku ja laiemalt biosfääri energiaallikad;
- Saab aru elu kui iseorganiseeruva protsessi olemusest;
- Oskab kasutada omandatud õppekava järgnevates bioloogiakursustes;
- Mäletab füüsika ja matemaatika alustõdesided eeldusainest FA.

KKK

- Mida, kui palju, kuidas õppida?
 - Mida: Seda, millest loengutes juttu.
 - Kui palju (Kas valemid peavad olema peas?): Nii palju kui võimalik, nii vähe kui saab
 - Kuidas: Osaleda võimalikult paljudes loengutes, mõtelda kaasa ja õppida **pidevalt**





KKK

- Kas loengut võib küsimustega katkestada?
 - Mitte üksnes võib, vaid see on soovitatav, kui midagi segaseks jääb
 - Lolle küsimusi pole olemas (va siis, kui nad pole asjakohaseid)
- Kus saab näha hinnatud praktikumi, arvestuse, eksami jne töid?
- Kuidas ma saan muuta oma praktikumi jne aegasid?
 - Palun kooskõlastage Irina Bichelega
- Vene õppekeele koolide lõpetajad: Kas ma saan abi, kui ma kontroll- või eksamitööde küsimusest aru ei saa?
 - Jah, meil valdavad kõik õppejõud vene keelt. Pöörduge julgelt nende poole.



Loengumärkmed, -konspekt ja lisamaterjalid

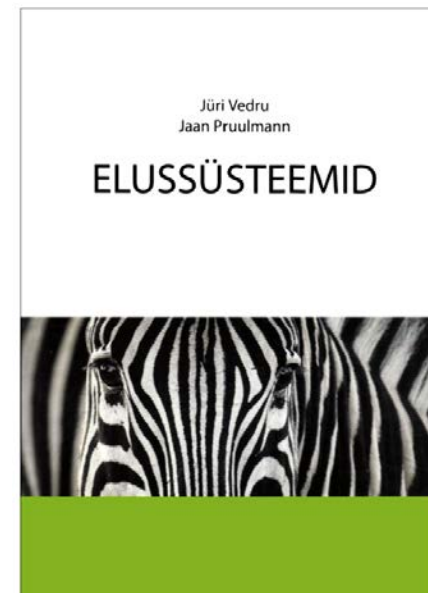
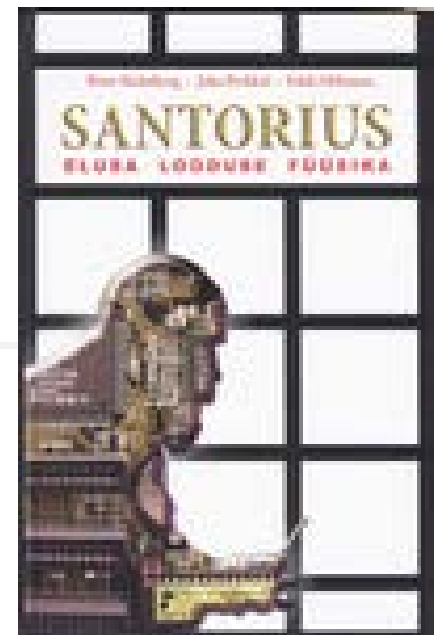
- <http://plantphys.ut.ee/kursused/fyysika.html>
 - Parool: **biofyysika**
 - Salasõna: **bgmr07023**
- Seal on kordamiseks üleval ka **Füüsika aluste** loengumärkmed
- Jooksvalt täieneva soovitava kirjanduse loetelu leiate **lisast**.
- Kellele sellest väheks jääb, vaadake palun FI biofüüsika labori kodulehekülge: <http://www.fi.tartu.ee/labs/bfl/?lang=est>

Samast leiate baka-, magistri- jne tööde teemasid, mida meie labor välja pakub

**Kes loengukonspektist vigu leiab, saab boonuspunkte!
Aktiivsus loengutes on samuti positiivne näitaja!**

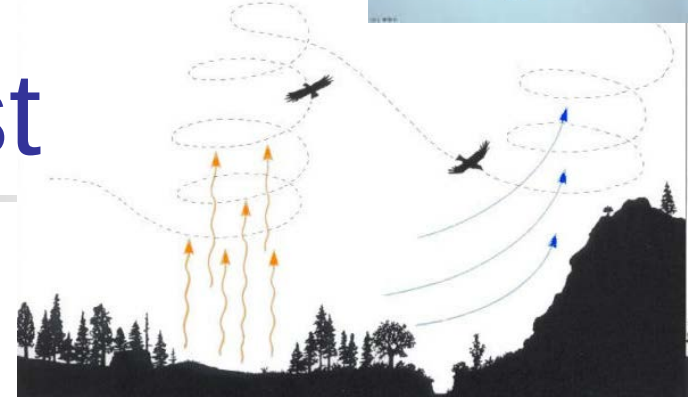
Veel emakeelseid allikaid

- Peter Holmberg, Juha Perkkiö, Erkki Hiltunen
Santorius. Elusa looduse füüsika Ilo 2007
Kõrgkoolidele mõeldud õpik käsitleb nii teoreetiliselt kui ka rohkete näidete varal bioloogia ja meditsiini füüsikalisi aluseid ning füüsika rakendusi neis ainevaldkondades. Teos sobib biofüüsika õppevahendiks arstide ja mitme teisegi eriala (füüsika, keemia, bioteaduste jmt.) spetsialistide ettevalmistamisel, samuti on see kasutatav käsiraamatuna nii üliõpilastele, õppejõududele kui ka gümnaasiumiõpetajatele.
- Jüri Vedru, Jaan Pruulmann
Elussüsteemid (loengukonspekt)
TTÜ Kirjastus 2012
- Quantum Spin-Off — kõrgtasemel teaduse ja ettevõtluse viimine koolidesse
<https://sisu.ut.ee/quantum/6ppemoodulid>
- Jooksvad viited loengukonspektis



Linnulennuline ülevaade kursusest

Soaring Flight



- Sissejuhatus ainesse
- Molekulid aatomitest
- Lausaine omadused
- Termodünaamika alused
- Bioenergeetika alused

- Kursuse eesmärgiks on anda ettekujutus molekulaarse (sh bioloogilise) aine ehitusest ja funktsioneerimise üldistest seaduspärasustest
- Bioloogilise füüsika sügavam eesmärk on uurida füüsika põhipostulaatide kehtivust ja asjakohasust bioloogiliste küsimuste lahendamisel

Milleks bioloogidele füüsika?

- Kuulus evolutsioonibioloog Ernst Mayr (1904-2005):
Füüsika pole kunagi midagi andnud bioloogia mõistmiseks
- Sydney Brenner, Nobel prize winner:
The trouble with physics is that its deepest pronouncements are totally incomprehensible to almost everybody except the deepest physicists, and while they may be absolutely true, they are pretty useless... to understand E. coli.



- Need seisukohad väljendavad sügavat pettumust füüsika kui „*science of everything*“ suhtes
- Newtoni füüsikas, mida pahatihti kogu füüsikaga samastatakse, pole tõepoolest elul kohta
- 19. saj tekkinud, ja kohati siiani elujõuline, **vitalism** oli reaktsioon selle

Ühe osake ja ühe jõuga maailmas poleks elu



- Tänapäeva füüsika eristab 4 stabiilset osakest

- Prooton
- Neutron
- Elektron
- Neutriino

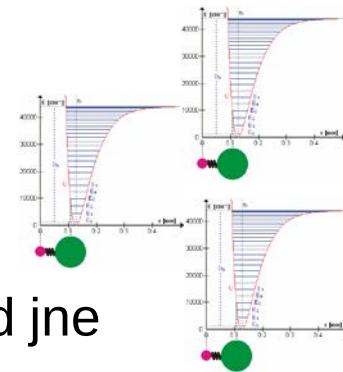
ja 4 fundamentaalset jõudu **Mis need on?**

- Newtoni füüsikas on enamik mõisted absoluutsed (muutumatud), sh aeg, ruum, kehade mass, kehade mõõtmised jne
- Tänapäevase füüsikateaduse valguses ilmnevad objektide omadused suhetes (interaktsioonides) teiste objektidega

- Lihtne näide: metronoomide (pendlite) sünkroniseerimine. **Miks?**

<https://www.youtube.com/watch?v=5v5eBf2KwF8>

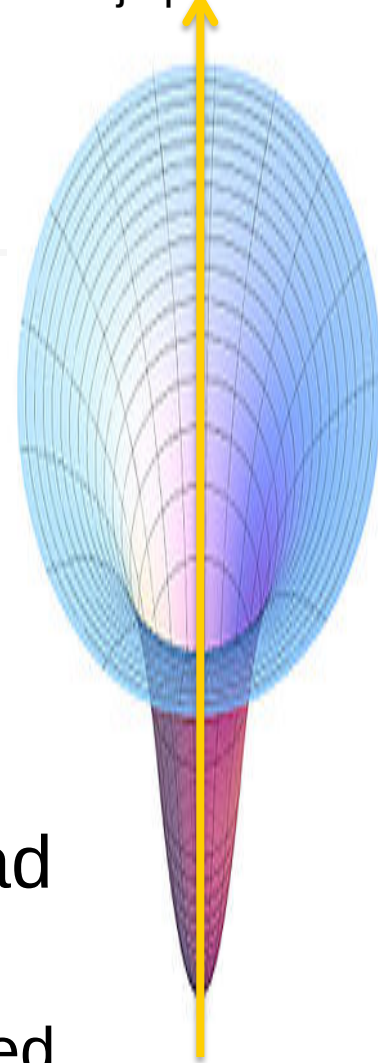
- Sellest tuleneb meid ümbritsevate nähtuste pea lõpmatu mitmekesisus
- Interaktsioonidest sõltuvus avaldub kõige drastilisemalt kvantfüüsikas



Vastastikmõjusid vahendavad välja kvandid

- Kehad mõjutavad üksteist väljade vahendusel
 - Kehade kokkupuudet tegelikult ei toimu
 - Teatud juhtudel on kokkupuude isegi raskesti defineeritav, sest alusosakesed (nt elektron) on teooria järgi singulaarsused ehk matemaatilised punktid
- Vastastikmõju (interaktsiooni) vahendavad osakesed
 - Kvantväljateooria kohaselt mõjutavad reaalsed osakesed üksteist virtuaalsete osakeste (kvantide) kiirgamise ja neelamise teel

Energia või
välja potentsiaal



Mida tähistab
horisontaaltelg?

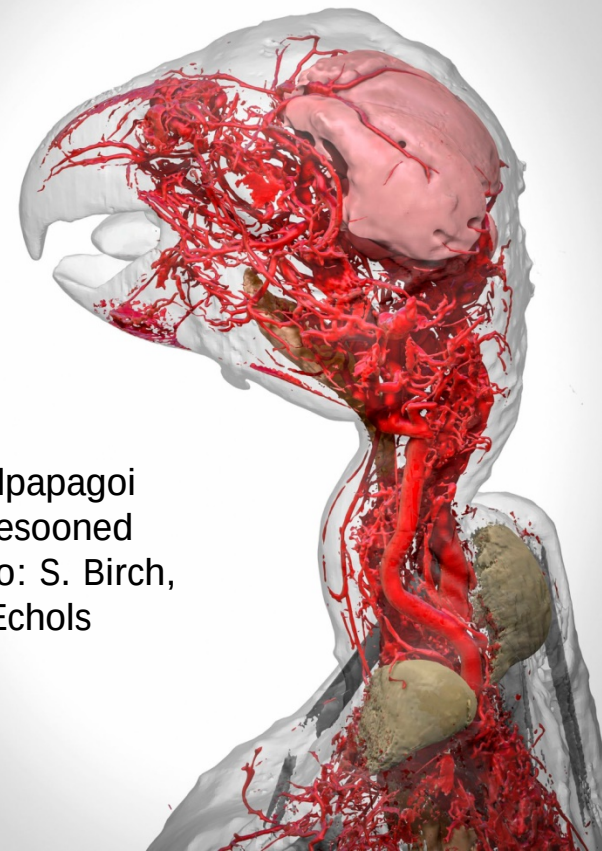
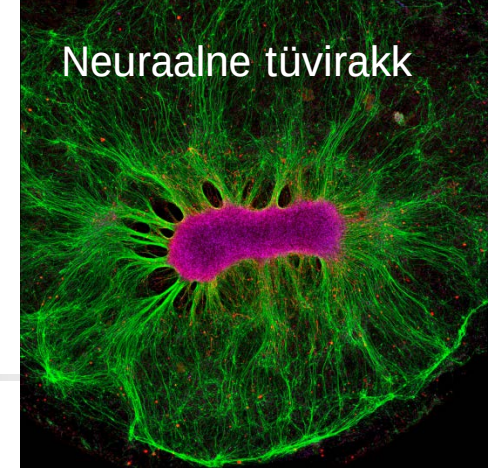
Virtuaalsed osakesed



- Virtuaalsed vaheosakesed eksisteerivad kvantmehaanilise määramatuse printsiibi tõttu väga piiratud aja jooksul väga väikeses ruumiosas
 - Nt aatomituuma ja tema elektronkatte vahelist elektromagnetilist vastasmõju vahendavad virtuaalsed footonid
 - Glüonid vahendavad mida?
 - Vahebosonid vahendavad mida?
- Virtuaalsed on nad sellepärast, et vastavat osakest on nende lühikese eluea tõttu võimatu fikseerida ja siis uurida
- Samas nt elektroni ergastamine aatomi valentselektronkihis toimub täiesti reaalse footoni neeldumise tulemusena.
 - Aatomite ergastatud seisundi eluiga on 1 ns kuni 1 ms suurusjärgus, mida on tänapäevaste vahenditega suhteliselt kerge mõõta

Eluks vajalikud tingimused

- Erinevate stabiilsete aatomite olemasolu
 - Klassikalise füüsika valguses seletamatu, sestap on Newtoni maailm kurvalt elutu; seletab kvantfüüsika
- Aatomeid peab universumi arenedes juurde tulema
 - Vajalik tähtede olemasolu, kus elemente tuumasünteesi käigus sünteesitakse
- Kaosest peab tekkimine kord
 - Vajalik madala entroopiaga energia pidev juurdevool - Universumit peab täitma valgus (mis lähtub tähtedelt)



Hallpapagoi
veresooned
Foto: S. Birch,
S. Echols

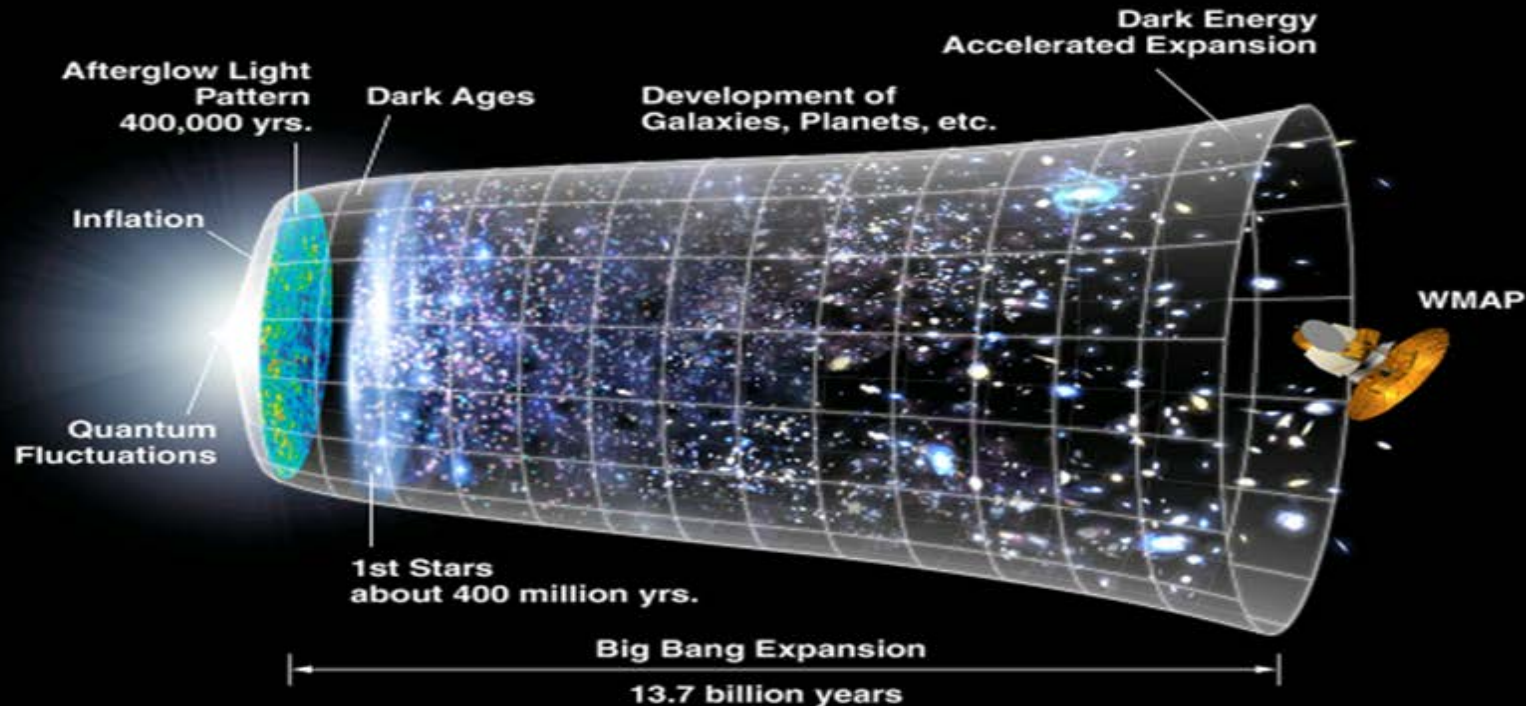
Termiline tasakaal ei toeta elu!



- Et midagi huvitavat toimuks, peab eksisteerima temperatuuride vahe
- Seepärast võiks proovida elu fenomeni kirjeldada soojusmasina teooria seisukohalt (sellega tutvume hiljem)
- Elu Maal on võimalik seetõttu, et on olemas **kuum keha** (Päike), **külm keha** (külm maailmaruum) ning **töötav keha** (Maa)
- Td II seaduse kohaselt läheb soojusenergia alati üle soojemalt kehalt külmemale, mistõttu soojem keha jahtub ning külmem keha soojeneb kuni T-de võrdsustumiseni
- T ühtlustudes saabub nn **soojussurm**
- Piisavalt pika aja jooksul võrdsustuvad kõik T-d

Universum, mitte ainult biosfäär, evolutsioneerub

Loe selle kohta:
Lee Smolin
„*Life of the Cosmos*“
Oxford UP
1997



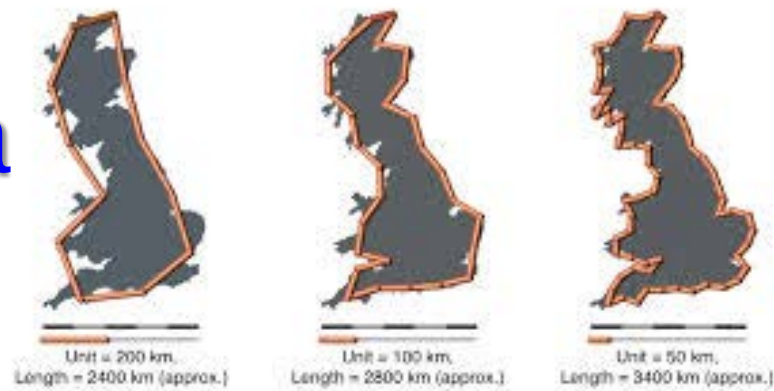
- **Evolutsiooniprintsiip (Darwin, 1859)** kirjeldab arenguprotsessi, kus süsteemi mitmekesisus suureneb (väheneb tema sümmeetria ja ilmnevad (*emerge*) uued omadused)
- Astrofüüsikalised andmed kinnitavad Universumi ajalist evolutsiooni
- Fossiilsed andmed kinnitavad biosfääri ajas kasvavat mitmekesisustumist

Termodünaamiline paradoks

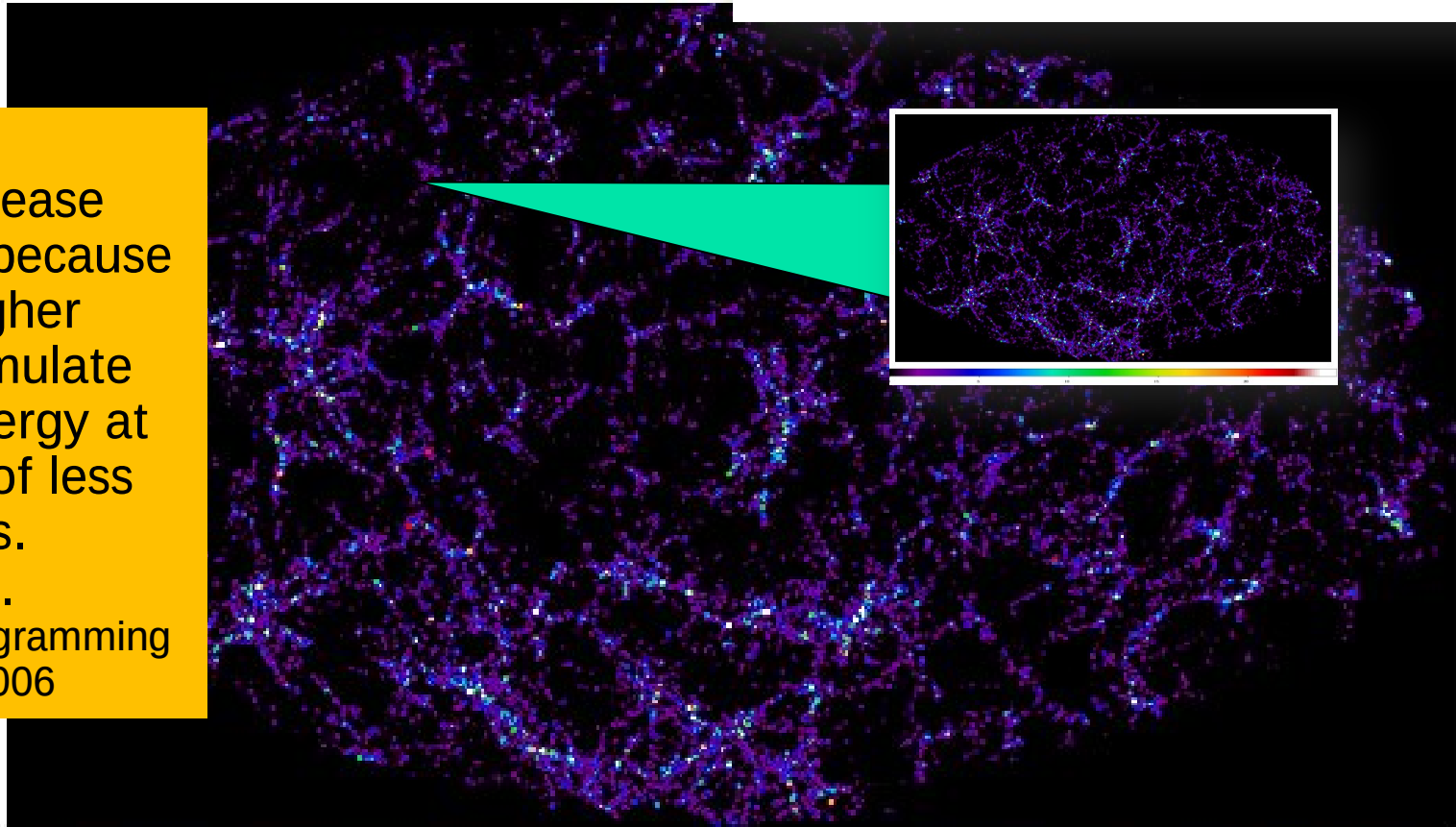


- Universumi vanus on 13.82 miljardit aastat
- Selle ajaga võiks olla saabunud soojussurm, kuid ilmselgelt see nii ei ole (elugi tekkis ~4 miljardit a tagasi)
 - Paradoksi sõnastas 1865. a üks termodünaamika rajajaid Rudolf Clausius
- Kaasaegne seletus:
Paisuv Universum, kus ainet ja valgust pidevalt juurde tekib, pole tasakaalus, seega ei ole ka paradoksi
 - Loe lähemalt
<http://www.horisont.ee/node/742>

Universumil võib olla fraktaalne struktuur



Gravitational clumping increase information, because regions of higher density accumulate more free energy at the expense of less dense regions. So life begins. Seth Lloyd: „Programming the Universe“, 2006



Kas universumi rikkalik struktuur on juhus või universumis toimuvate protsesside vältimatu tagajärg? Pigem viimane!

1 va~ $1 \cdot 10^{13}$ km

Päikesele lähim täht on ~4 va kaugusel

1 pc=3.26 va ~ $3.1 \cdot 10^{13}$ km

Jälgitav Universum sisaldab

- 1 aatom 1 m^3 kohta
(kokku 10^{80} aine osakest
(prootonit ja neutronit) ning
 10^{90} footonit ning neutriinot)
- 1 Maa-sarnane planeet
(10 valgusaasta)³ kohta
- 1 täht $(10^3 \text{ va})^3$ kohta
- 1 galaktika $(10^7 \text{ va})^3$ kohta
- 1 universum
 $(10^{10} \text{ va})^3$ kohta

■ Allikas: J.B. Barrow
The Constants of Nature, 2002

Vrd: igaüks meist sisaldab ~ 10^{28} prootonit ja neutronit. **Kontrollige, kas suurusjärk on õige!**

Elementide suhe Universumis

■ Vesinik	10000
■ Heelium	1000
■ Hapnik	6
■ Süsinik	1
■ Ülejäänud	1

Kõik elemendid peale H ja He on sünteesitud tähtedel!

Tähed sünnivad galaktikates (läbimõõt >10 va)

Galaktikate tähtedevahelises ruumis on leitud hulganisti orgaanilisi molekule, sh kuni 20-aatomilisi

H B																	He B
Li C	Be C																
Na L	Mg L																
K L	Ca L	Sc L	Ti \$ L	V \$ L	Cr L	Mn L	Fe \$ L	Co \$	Ni \$	Cu L	Zn L	Ga \$	Ge \$	As L	Se \$	Br \$	Kr \$
Rb \$	Sr L	Y L	Zr L	Nb L	Mo \$ L	Tc L	Ru \$ L	Rh \$	Pd \$ L	Ag \$ L	Cd \$ L	In \$ L	Sn \$ L	Sb \$	Te \$	I \$	Xe \$
Cs \$	Ba L		Hf \$ L	Ta \$ L	W \$ L	Re \$	Os \$	Ir \$	Pt \$	Au \$	Hg \$ L	Tl \$ L	Pb \$	Bi \$	Po \$	At \$	Rn \$
Fr \$	Ra \$																
La L	Ce L	Pr \$ L	Nd \$ L	Pm \$ L	Sm \$ L	Eu \$	Gd \$	Tb \$	Dy \$	Ho \$	Er \$	Tm \$	Yb \$ L	Lu \$			
Ac \$	Th \$	Pa \$	U \$	Np \$	Pu \$	Am M	Cm M	Bk M	Cf M	Es M	Fm M	Md M	No M	Lr M			

Big Bang
B

Cosmic rays
C

Large stars
L

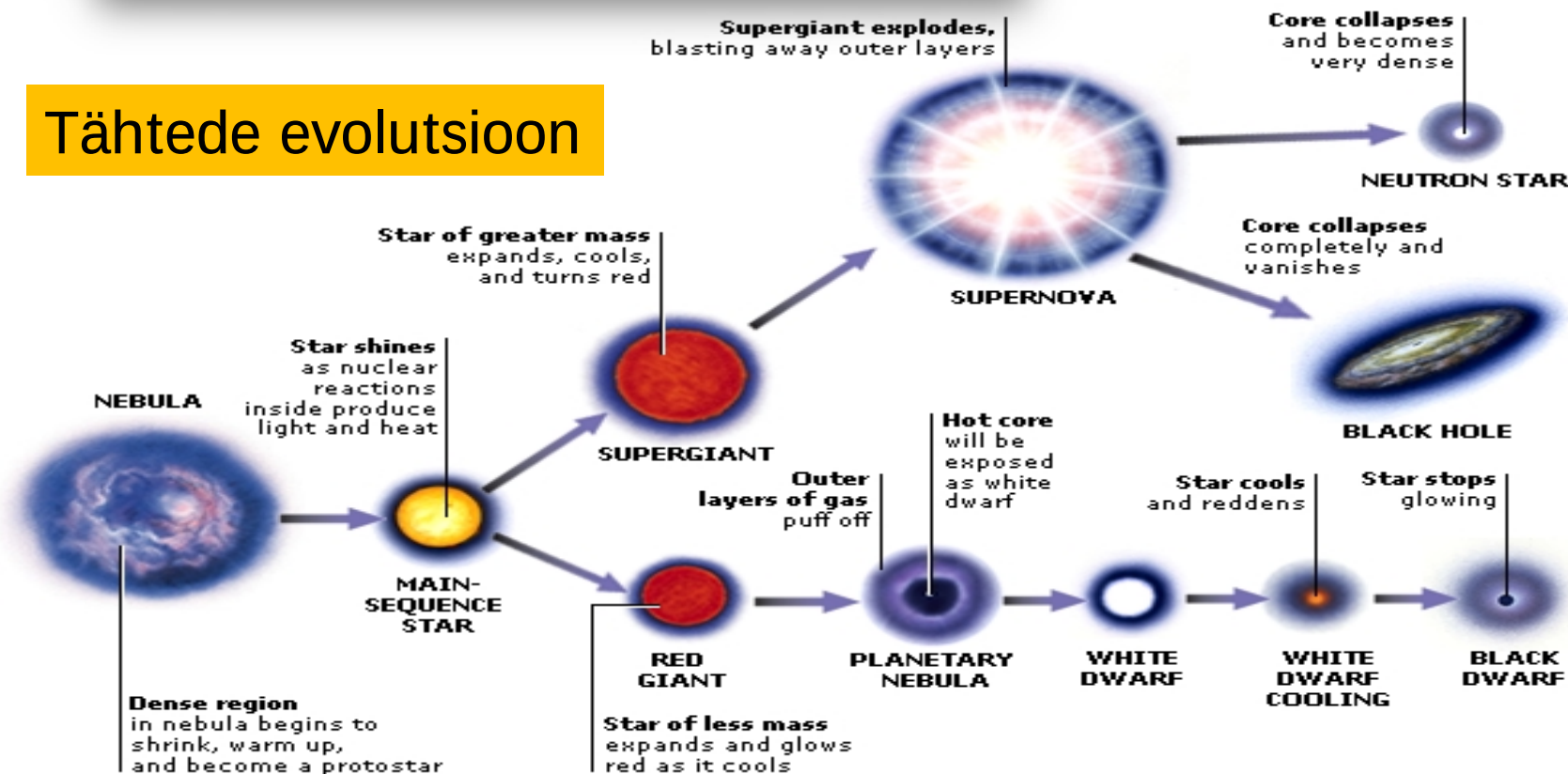
Small stars
S

Super-novae
\$

Man-made
M

Peaaegu kõik eluks vajalikud elemendid sünteesitakse tähtedel

Tähtede evolutsioon



Elu Maal on eelkõige võimalik tänu Päikese valgusele

- Kui elusa ja elutu vahe on organiseeritus, siis just Päikeselt saadava valgusenergia abil iseorganiseerub eluta aine elusaks aineks
- Päike on üks täht paljude omataoliste hulgast
- Seega on elu mõistmiseks vaja aru saada, miks on Universum täidetud tähtedega.
 - Seda uurib astrofüüsika
- Valguse olemust selgitab kvant-elektrodünaamika

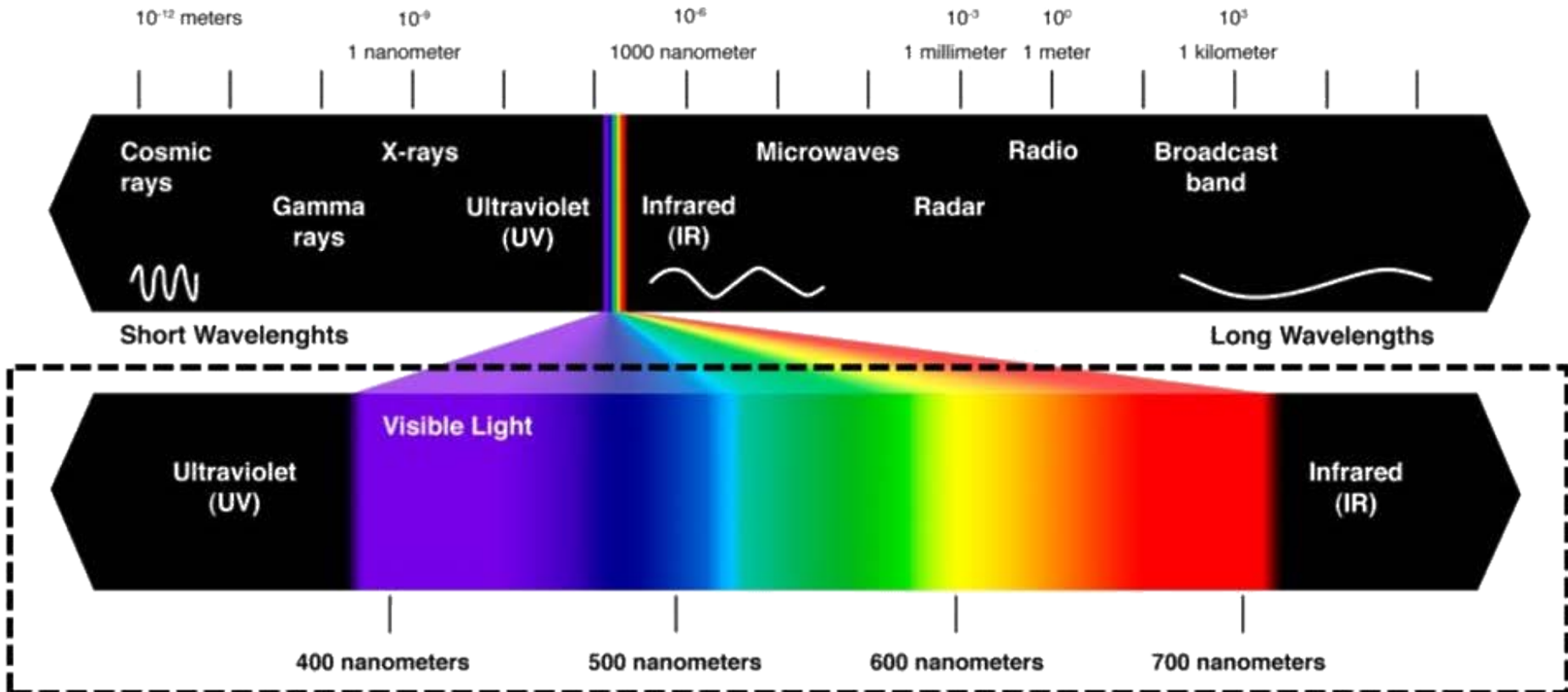


Elektromagnetilise kiirguse sagedusspekter ulatub 0-st ∞

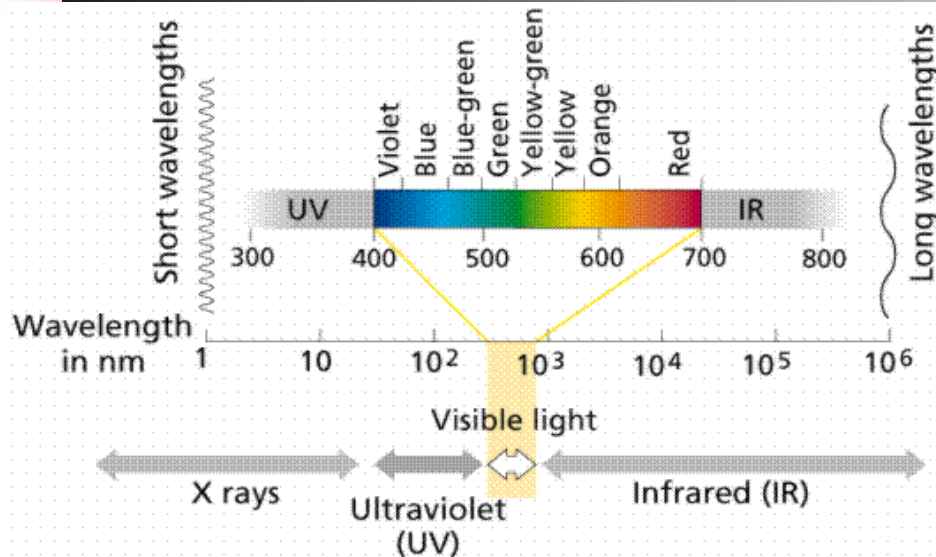
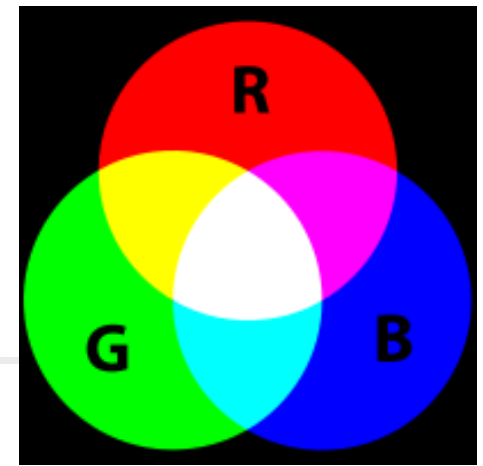
$$E = h\nu \quad \nu\lambda = c$$

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{c}{\lambda} [\text{Hz}]$$

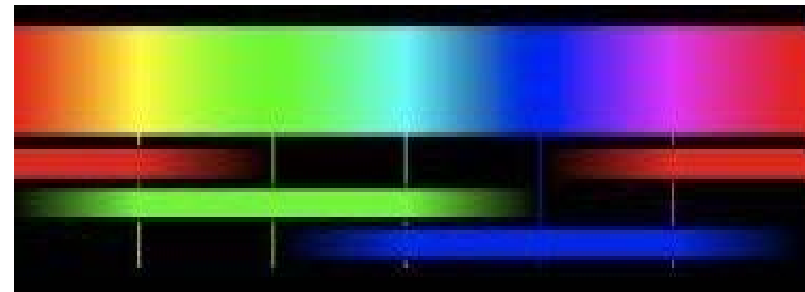
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E}{hc} [\text{cm}^{-1}]$$



Miks näib (nähtav) valgus “valge”?



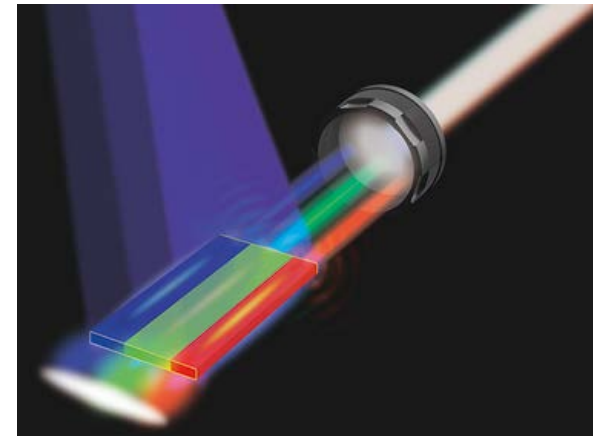
Esmased ja sekundaarsed värvid



TV monitori ja raalikuvari värvid

White light laser: The three parallel segments are capable of lasing in any visible color, completely tunable from red, green to blue, or any color in between. When the total field is collected, a white color emerges:

ASU/Nature Nanotechnology



KUST ON PÄRIT MEIE PÄEVITUS?



PÄIKE

1 sekstillion
footonit sekundis



TAEVAS HAJUNUD VALGUS

300 kvintillionit ehk
 $300 \cdot 10^{18}$ footonit sekundis



KOSMOSETOLMULT PEEGELDUNUD VALGUS

100 trillionit footonit sekundis



GALAKTIKAVÄLINE TAUSTAKIRGUS
10 miljardit footonit sekundis



GALAKTIKAD

5 miljardit footonit sekundis



MUSTAD AUGUD

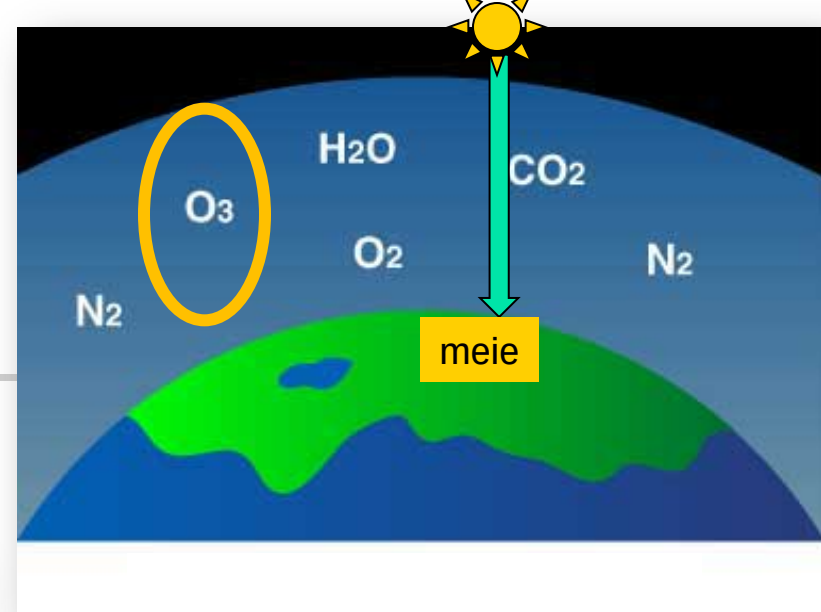
5 miljardit footonit sekundis

LISAKS

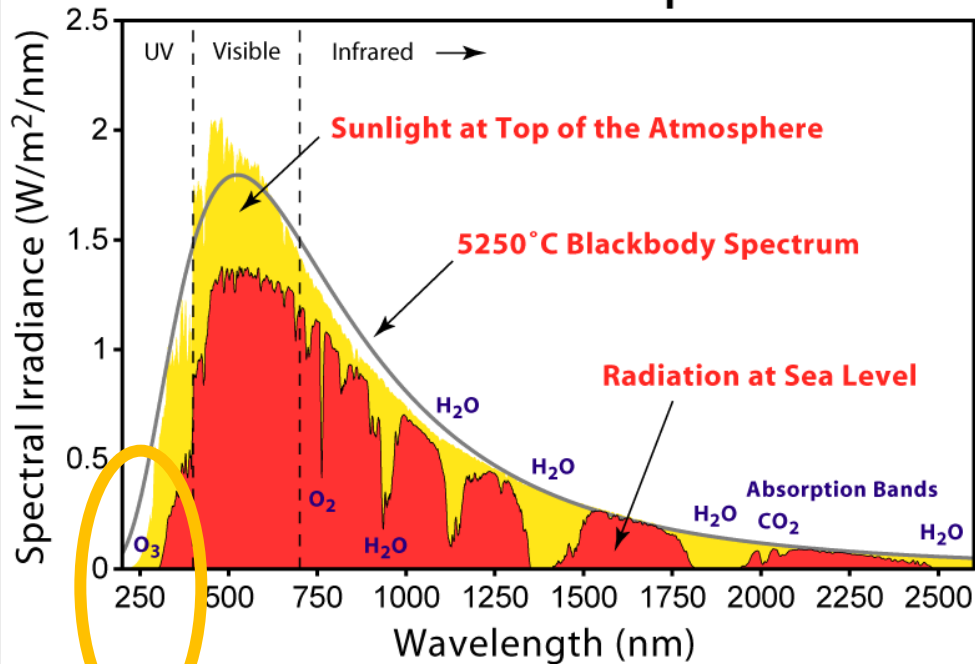
„jõuavad meieni 10 kvadrillionit (10^{15}) Suurest Paugust üle jäänud footonit, kuigi need ei mõjuta meie päevitust.



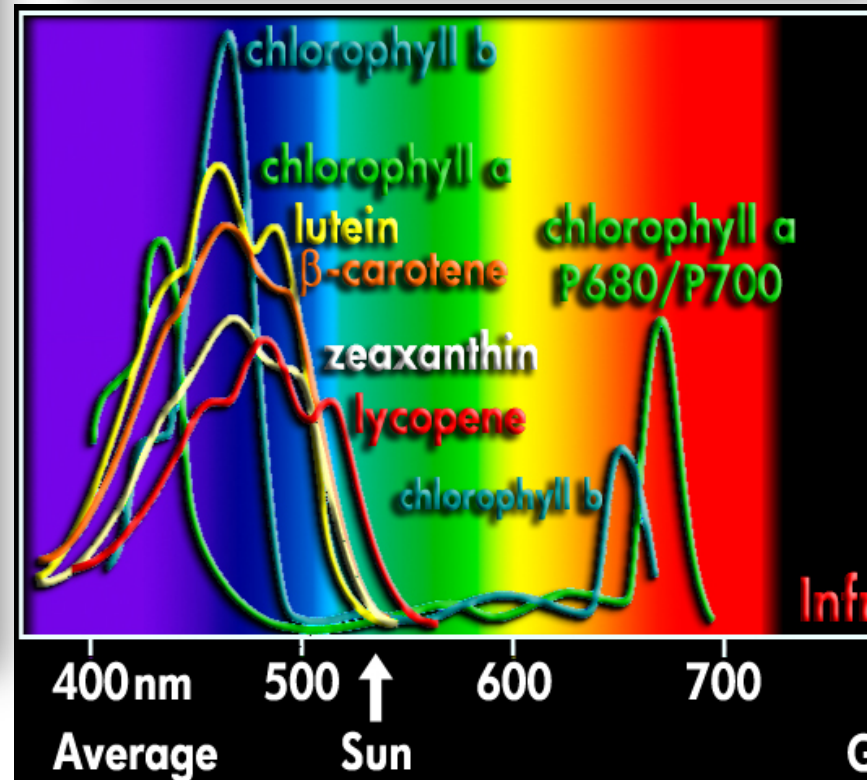
Valgus, mida elusloodus „näeb“



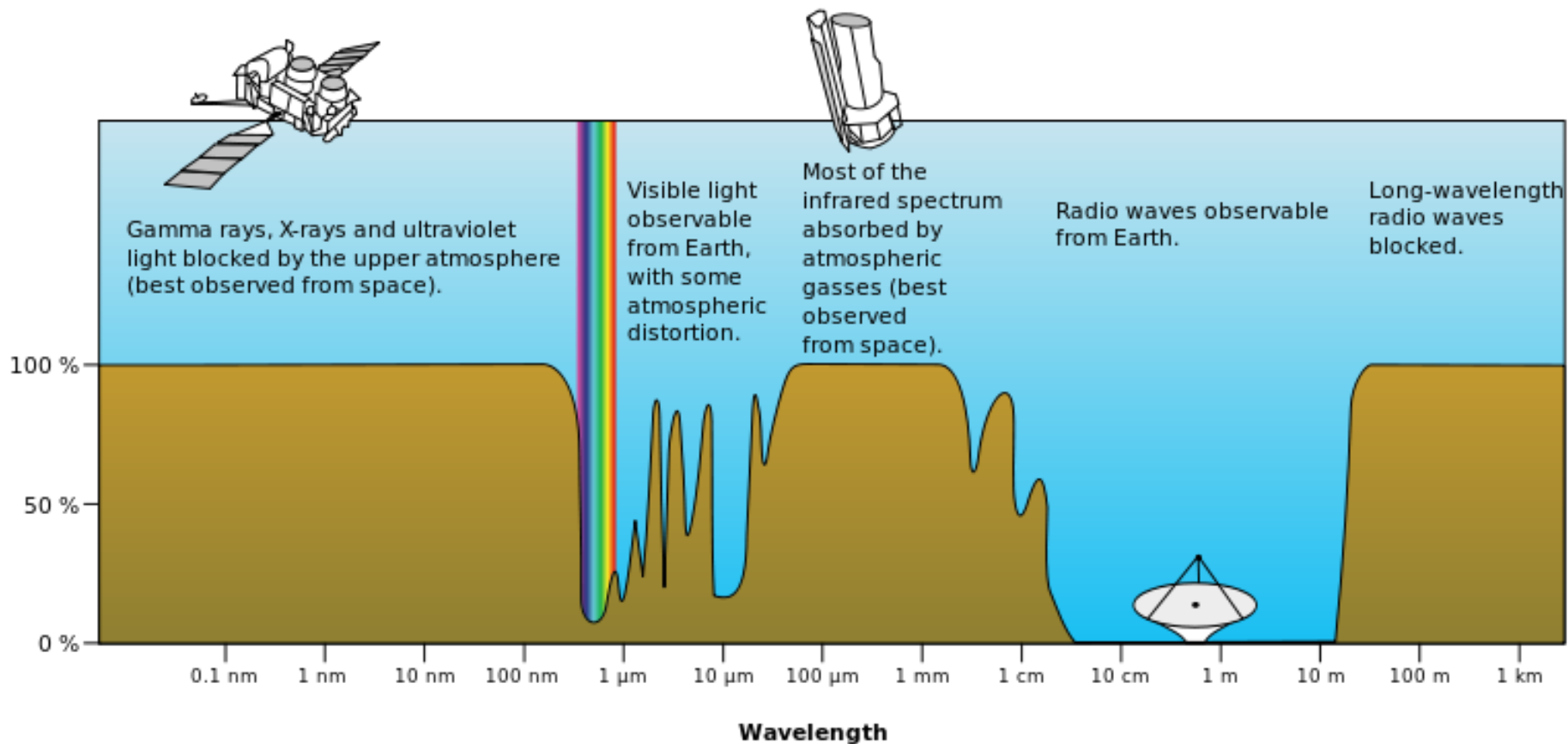
Solar Radiation Spectrum



Elupäästev osooni-filtri efekt



Atmosfääri neeldumine lühilainelises piirkonnas annab elule võimaluse



Bioenergeetika



Ilya Prigogine
1917 Venemaa–2003 Belgia

- Eluks on vajalik **aine ja energia** pidev **transport** ehk **suunatud liikumine** (vrd töö) läbi **biosfääri**, konkreetset läbi bioloogilise aine
- Füüsikalise keemia seisukohalt ei toeta isoleeritud ja samuti suletud süsteemid elu
- Elussüsteemid on avatud dissipatiivsed süsteemid (termin Prigogin'lt), mis toodavad lokaalset korda hajutades intensiivselt entroopiat

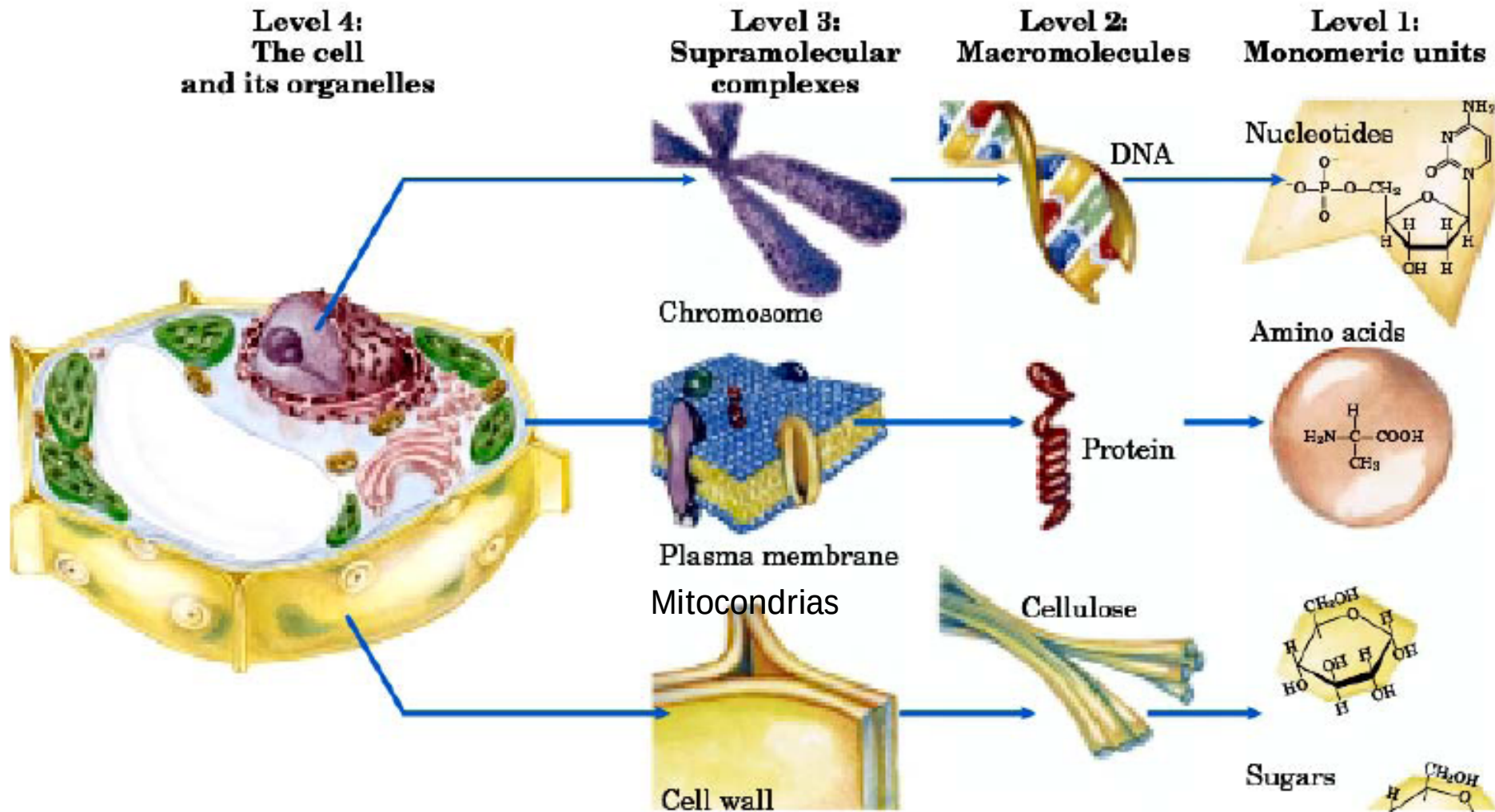
Objekt	Keskmine dissipatsioon, W/kg
Inimene	1,4
Päike	0,00023

Energia ja/või aine



Cell = building block of living matter

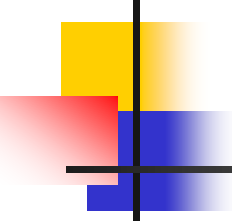
self-contained, self-organizing, self-perpetuating, isothermal system that is far from equilibrium (continuously extracts energy and raw materials from its environment)



A vibrant landscape photograph featuring a large, multi-colored rainbow arching across a dramatic, cloudy sky. Below the rainbow, a calm body of water reflects the sky and the surrounding greenery. In the foreground and middle ground, several large, golden-yellow hay bales are scattered across a grassy field, some partially submerged in the water. The overall scene is peaceful and scenic, with a mix of natural elements like the rainbow, water, and vegetation.

See kursus on energiast!

Energiast ülevaatlilikult



Mida koolis energiast räägiti?

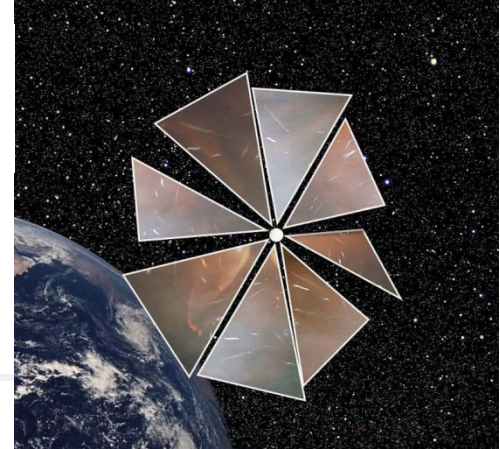
- Energia on jääv
 - See väide pole iseenesestmõistev, aga loodetavasti lohutab teadmine, et protsessides võib energia ühest vormist teise üle minna (nt pendel)
- Energia esineb kahes vormis: kineetilises ja potentsiaalses

$$E_{kin} = \frac{mv^2}{2} \quad E_{pot} = mgh$$

- Energia ja aine (mass) on üks ja sama

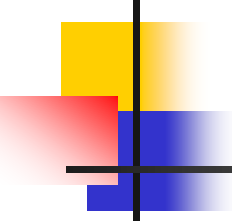
$$E = mc^2$$

???



- Kõik valemid sisaldasid massi **m**
- Kuidas siis valguse energiat seletada?
Õps ju selgitas, et valgusenergiat kannavad ilma massita footonid
- Ometi Päike meid soojendab ning tudengid kavandavad isegi päikesepurje (teiste sõnadega footon-mootorit)
- 100 a tagune lahendus (Planck, Einstein, de Broglie):

$$E = h\nu = cp$$



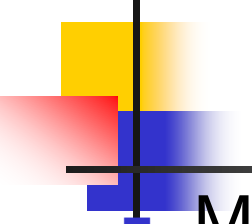
Mida veel koolis energiast räägiti?

- Energia on töö tegemise mõõt
 - Anti isegi arvutusvalem, kuidas tööks kaudu kulunud energiat mõõta
- Igaüks, kes on kasvõi kordki füüsilist tööd teinud teab, et ehkki mitte lausvale, ei saa see ometi kogu tõde olla
 - Osa energiast kulub paratamatult soojuseks



Mida tavaliselt koolis selgeks ei räägita on energia, töö ja soojuse vahekord

- Selles mõttes takerdub koolifüüsika 150 a tagusesse aega, kus energia jäävuse seaduse olemus polnud veel päris selge ja aine atomaarset ehitust üldiselt ei tuntud/tunnustatud
- Just selle küsimuse üle juurdlemine viis arst Julius von Mayeri energia jäävuse seaduse (ning füüsika ja bioloogia sügava omavahelise seose) avastamiseni (1841-1845)
- Tegelikult pole töö ja soojus energia sünonüümid, vaid energia ülekande kaks erinevat vormi
- Sestap räägib termodünaamika eraldi **vabast energiast**, so energiast, mis üle kandudes 100% kasulikuks tööks muundub
- Soojusenergia vormis ülekantud energia tööks muundamise kasutegur on palju väiksem (Carnot)



Energia tarbimise sisu

- Me räägime energia tarbimisest ja kurdame, et energiat ei piisa
- Energia jäävuse seaduse kontekstis need väited ei päde
- Energia puhul tuleb peale energia hulga rääkida ka energia kvaliteedist (seda mõõdab entroopia)
- Energia tarbimise käigus tema kvaliteet langeb (energia hajub nii ruumilises kui liikumise korrapära mõttes), aga tema hulk ei muutu
- Seega me tarbime energia kvaliteeti, mitte energiat ennast

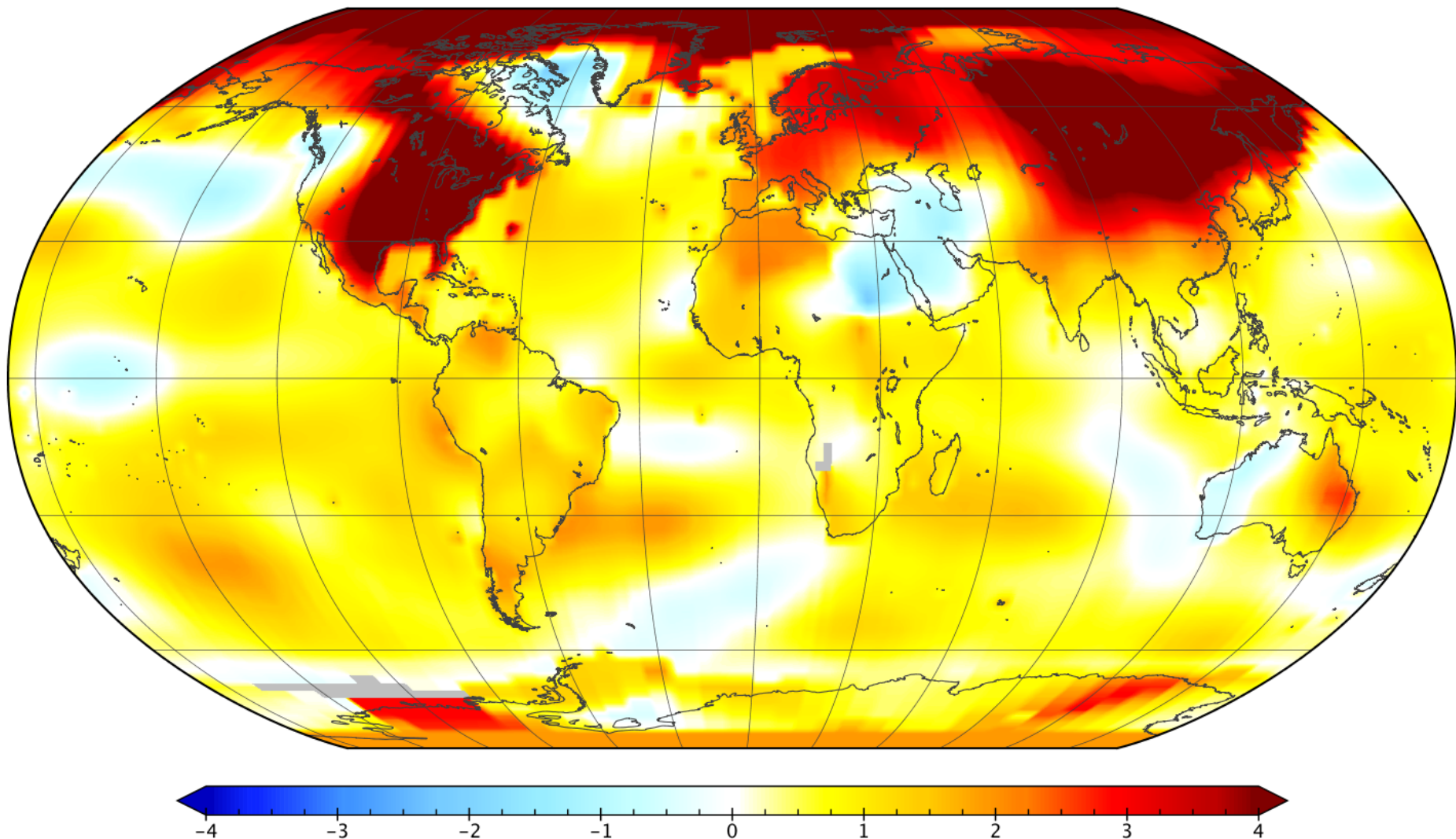
Globaalne soojenemine

- Maa energiabilanss peab üldjoontes tasakaalus olema: sama palju energiat kui Maa saab, peab ta ka ära andma
- Maa biosfäär „jahvatab“ Päikeselt saabuvas footonid väiksemateks osadeks, mis atmosfääri nii hästi ei läbi
 - „Jahvatamise“ koefitsient: $6000/300=20$
- Inimtegevuse tulemusel paisatakse atmosfääri nn kasvuhoonegaase, mistõttu tema läbipaistvus järjest väheneb
- Tulemuseks on temperatuur kasv



2017 a veebruar oli ajaloos kõige soojem

February 2017

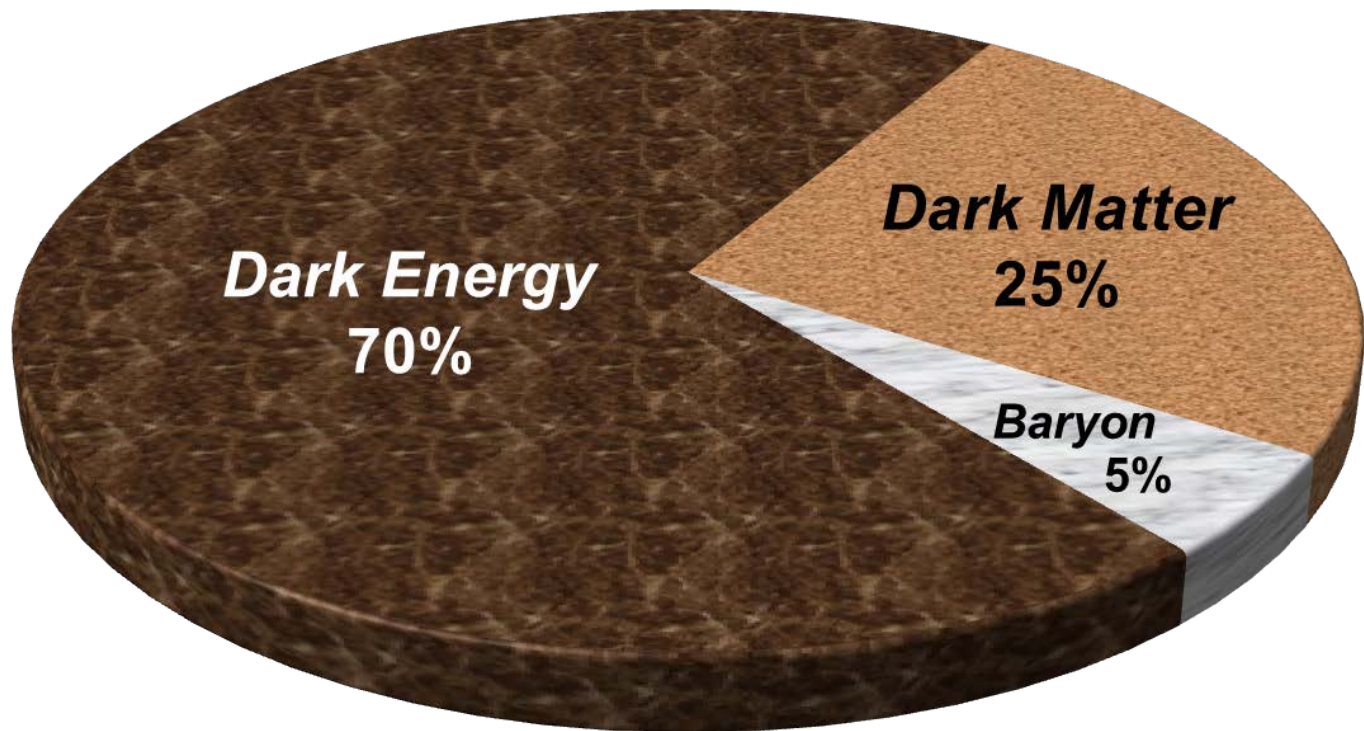


Base Period: 1951–1980

Data Min = -2.2, Max = 7.4, Mean = 1.1

NASA/GISS/GISTEMP

Energias on asju, millest keegi veel aru ei saa: Materiasst vaid pisku on nähtav aine



Just tume energia võib olla põhjus, mis „lökkab“ universumit laiali ja muudab teda aina keerulisemaks (struktuursemaks)

